

УДК 621.175.32

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.160946

Синтез дробномірною $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора замкнутої системи керування вентильно-індукторним двигуном

В. К. Титюк, О. П. Чорний, М. Л. Барановська, С. А. Сергієнко,
Ю. В. Зачепа, Л. І. Цвіркун, В. В. Кузнецов, М. М. Трипутень

Обґрунтовано актуальність створення високоякісних систем управління для електроприводів з вентильно-індукторним двигуном (SRM). Використовуючи методи математичного моделювання були отримані перехідні характеристики процесу пуску SRM з різними моментами інерції. На основі аналізу отриманих перехідних характеристик показані особливості процесу пуску SRM, обумовлені динамічною зміною параметрів SRM в процесі його пуску.

Показана низька точність ідентифікації SRM з використанням дрібно-раціональної функції класу $rat34$, коефіцієнт регресії отриманої моделі склав 85 %. На основі аналізу перехідних характеристик процесу пуску SRM була висунута гіпотеза про можливість ідентифікації SRM дробномірною передавальною функцією. Використовуючи методи математичного моделювання були отримані перехідні характеристики процесу пуску SRM з різними моментами інерції. За допомогою FOMCON MATLAB Toolbox виконана ідентифікація процесу пуску SRM дробномірною передавальною функцією другого порядку. Коефіцієнт регресії отриманої моделі склав 93–96 %.

Для отриманих дробномірних передавальних функцій реалізований метод синтезу дробномірною $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора, оптимізованого по мінімуму інтегральної квадратичної помилки (integral square error) перехідної функції замкнутої системи керування дробномірним об'єктом управління. Для синтезу $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора був застосований FOMCON MATLAB Toolbox.

Виконано порівняльний аналіз процесів запуску SRM в розімкнутій системі управління, а також запуску в замкнутій системі управління з класичним PID-регулятором цілого порядку і з дробномірним $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятором. Використання дробномірною $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора в порівнянні з класичним регулятором цілого порядку дозволяє знизити перерегулювання з 13.3% до 2.64%, підвищити швидкодію в замкнутій САУ, час регулювання знизився з 1.48 с до 0.53 с. Отримані результати можуть бути використані для підвищення якості роботи замкнутих систем управління кутовою швидкістю SRM

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун, ідентифікація, дробномірною передавальна функція, якість управління, дробномірний регулятор

1. Введение

Вентильно-индукторный электропривод (SRM), учитывая простоту его конструкции, высокую надежность, высокие энергетические показатели, высокие регулировочные характеристики являются одним из самых перспективных

типов современных электроприводов для использования в энергоемких производствах [1].

Вентильно-индукторные электрические двигатели (SRM), обладают рядом преимуществ по сравнению с другими управляемыми электроприводами переменного тока. SRM конструктивно более просты, более технологичны в изготовлении, обслуживании и ремонте, имеют меньшую себестоимость. Эти двигатели обладают повышенной энергетической эффективностью и более высокой перегрузочной способностью по сравнению с АД и СД. В [2] выполнен сравнительный анализ характеристик асинхронного двигателя, синхронного двигателя с постоянными магнитами и SRM типоразмера NEMA 184T, табл. 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик электродвигателей различных типов.

Характеристика	Асинхронный двигатель	Синхронный двигатель с постоянными магнитами	SRM
Вес ротора, Lbs	18.80	15.20	14.80
Вес статора, Lbs	51.20	54.20	45.30
Вес общий, Lbs	70.00	69.40	60.10
КПД, %	90	94	92
Стоимость материалов, USD	59.75	384.00	47.10
Torque/\$/Lbs	0.57	0.25	0.148

Это имеет важное значение для ответственной техники (горно–, нефте– и газодобывающей, горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, нефте– и газоперекачивающей, тепло– и водоснабжения, транспортной, военного назначения и др.) [3].

Поэтому задача создания высококачественных и относительно простых систем управления для электроприводов с SRM становятся все более важными и актуальными. Однако решение этой задачи затрудняется существенно нелинейными характеристиками SRM, что затрудняет идентификацию SRM как объекта управления и последующий синтез замкнутых систем управления.

Полученные результаты могут быть использованы для создания методов идентификации передаточной функции SRM, упрощения конструкции и повышения качества работы замкнутых систем управления SRM.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В настоящее время лидером в разработке и внедрении электроприводов с SRM малой и средней мощности является японская компания Nidec Corporation. Суммарный объем продаж NMC в 2014 финансовом году составил около \$ 10 млрд [4–6].

NMC серийно выпускает под брендом U.S. Motors линейку промышленных SRD малой и средней мощности 20–420 л.с. (14,7–308,7 кВт) на номинальные

частоты вращения 1000, 1800, 3600 и 4500 об/мин. с перегрузочной способностью 110 %, 150 % и 250 % [6]. У компаний Nidec SR Drives Ltd. (NSRD) и Nidec SR Drives Manufacturing Ltd. (NSRM) в Великобритании имеется внушительный послужной список применения SRM-технологии в горнодобывающей промышленности и в электроэнергетике.

Комплексное внедрение SRM на конвейерах, смесительных установках и грейферном кране мощностью от 40 до 250 кВт по лицензии NSRD проведено компанией Drax Power Ltd. (Селби, Северный Йоркшир). Компания Jeffrey Diamond на шахтах подземной добычи угля применила SRM-привод с жидкостным охлаждением во взрывозащищённом исполнении мощностью от 35 до 300 кВт на ленточных и забойных конвейерах, а также насосах [7].

Компания Weir Speciality Pumps Ltd. (Солт-Лейк-Сити, штат Юта, США), разработала насосы высокого давления VSR для подачи воды и топлива на газотурбинные генераторы, в которых по лицензии NSRD применила SRM мощностью 74 и 129 кВт [8].

Компания Le Tourneau Technologies, Inc. (США) занимается погрузчиков с мощностью дизельного двигателя от 1050 до 2300 л.с., оснащённых электро-механической трансмиссией на базе SRM.

В последние годы также наметилась устойчивая тенденция увеличения разработок тягового электропривода для гибридных автомобилей и электромобилей на базе SRM-технологии. В Европейском союзе реализуется проект ODIN (Optimized electric Drivetrain by INtegration) [9]. Этот проект направлен на создание электромобиля на базе SRM-технологии.

Темпы развития и внедрения вентильно-индукторных электроприводов на горнодобывающих предприятиях России приведены в работе [3]. Так, с 2012 года предприятием ООО ВИЭМ разработаны и внедрены проекты по использованию SRM на предприятиях Сибирской угольной энергетической компании суммарной мощностью 22,5 МВт. Реализован проект применения SRM мощностью 1250 кВт, 900 об/мин для магистрального ленточного конвейера КЛМ-4500 на Берёзовском разрезе в Красноярском крае. Разработаны SRM мощностью 1250 кВт, 630 об/мин для замены двигателей постоянного тока главных механизмов тяги, подъема и вращения карьерного экскаватора ЭШ 20-90 на Тугнуйском разрезе. Имеется опыт внедрения SRM мощностью 500 кВт, 850 об/мин для тягового электропривода карьерного самосвала БелАЗ-75131 грузоподъемностью 136 т. Приведенные факты демонстрируют расширение сферы применения SRM.

В существующей научно-технической литературе предлагаются различные подходы к конструированию систем управления электроприводов с SRM.

В [10] предлагается схема нелинейного управления с предсказанием для SRM на основе уравнений состояния объекта управления (TSE). На основе TSE и теории прогнозирующего управления разработан нелинейный интеллектуальный контроллер для системы управления SRM. Однако прогнозирующее управление требует дополнительных затрат времени на верификацию полученной модели, что ограничивает область применения объектами управления с постоянными или медленно меняющимися параметрами.

В [11] использован метод роя частиц (PSO) для определения оптимальных параметров пропорционально–интегрального (PI) регулятора, а также углов включения и выключения для минимизации пульсаций вращающего момента SRM. Предложенный метод оптимизации обладает медленной сходимостью, что ограничивает его область применения процессами с медленно изменяющимися параметрами.

В [12, 13] указывается, что SRM имеет существенно нелинейные характеристики, а для управления SRM рассмотрено два метода, которые были успешно использованы в других интеллектуальных приложениях моделирования и управления. Во-первых, для управления SRM используется система нейро-нечетких локально линейных моделей. Во-вторых, для контроля SRM используются методы нейронных вычислений. Полученные результаты указывают на применимость предлагаемых методов в интеллектуальном управлении этой существенно нелинейной системой. Однако этот подход требует значительных вычислительных ресурсов, как на этапе тренировки нейронной сети, так и непосредственно в процессе управления, что повышает стоимость управляющего устройства.

В [14, 15] показаны методы идентификации параметров обмоток и состояния двигателя, а в [16] описан метод идентификации SRM эквивалентным двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением и соответствующим управлением. Предложенный метод не снижает сложности объекта управления и не позволяет получить требуемые настройки системы управления при значительном изменении эксплуатационных режимов электропривода.

Известные методы управления SRM достаточно сложны и требуют значительных вычислительных мощностей встроенных управляющих устройств для их практической реализации.

В настоящее время получили значительное развитие методы управления нелинейными объектами на основе их представления дробномерными дифференциальными уравнениями [22].

Возрастающий интерес к приложениям дробного исчисления вызвал необходимость в разработке и исследовании специальных численных методов для решения дробномерных дифференциальных уравнений (FDE). Найти аналитические решения FDE действительно труднее, чем решать обыкновенные дифференциальные уравнения (ODE), и в большинстве случаев можно обеспечить численное приближение решения [17, 18]. Широко исследуются численные методы для решения задач FDE.

Одним из наиболее полных и функциональных приложений для решения задач FDE с возможностью анализа систем управления с дробномерными регуляторами и объектами управления [19] является FOMCON MATLAB Toolbox – свободно распространяемая библиотека, реализующая основные задачи, возникающие при идентификации FDE-систем. Эта библиотека частично включает в себя элементы других популярных библиотек, посвященных работе с объектами FDE – CRONE [20] and NINTEGER [22].

Техническая реализация быстродействующих $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регуляторов является сложной технической проблемой. Использование дискретных форм Грюнваль-

да-Летникова или Римана-Лиувилля, являющихся бесконечными рядами, теоретически предполагает выделение бесконечных объемов памяти и требует выполнения большого количества арифметических операций в течение периода квантования процессора. В [22] рассмотрены задачи синтеза систем управления для объектов управления с дробным порядком астатизма и разработаны методы технической реализации быстродействующих дробных интегрально-дифференцирующих регуляторов, что обеспечивает возможность технической реализации предложенного метода.

Поэтому развитие методов идентификации нелинейных объектов с помощью дробномерных передаточных функций применительно к SRM является перспективным, т. к. позволит повысить качество управления SRM.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является обоснование возможности идентификации SRM дробномерной передаточной функцией и синтез дробномерного $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора, что позволит повысить качество управления SRM.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- получить переходные характеристики SRM;
- выявить предпочтительный метод идентификации SRM путем сравнения показателей качества идентификации дробно-рациональными передаточными функциями целых порядков и идентификации дробномерными передаточными функциями;
- синтезировать дробномерный $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятор SRM, оценить показатели регулирования в замкнутой системе управления с полученным регулятором.

4. Регистрация переходных характеристик SRM на математической модели

Для исследования особенностей переходной характеристики SRM был использован метод математического моделирования динамических процессов при запуске SRM с применением библиотеки SimPower программы MATLAB. Эта библиотека содержит достаточное количество предопределенных вариантов технической реализации SRM с различным зубцовым соотношением статора и ротора.

Вариант реализации математической модели SRM приведен на рис. 1. С помощью данной модели были получены графики частоты вращения при запуске SRM для электродвигателей с различными зубцовыми соотношениями статора и ротора и различных номинальных мощностей. Полученные результаты представлены на рис. 2.

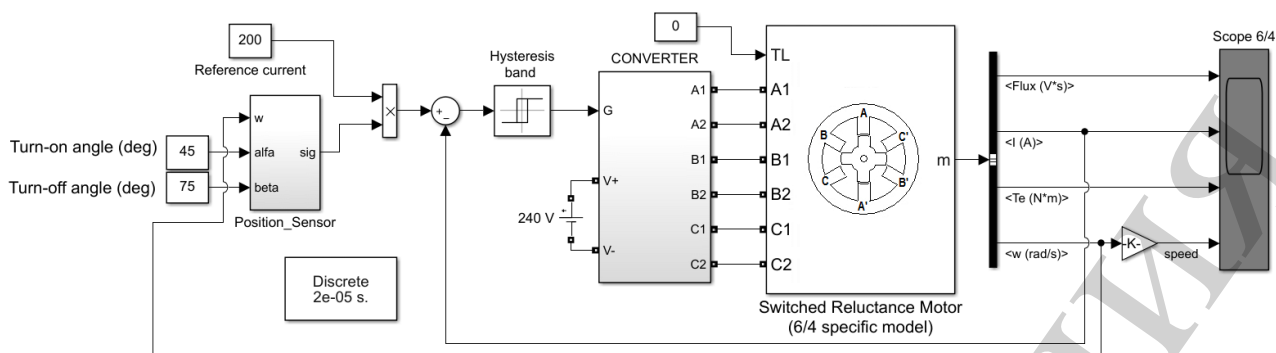


Рис. 1. Реализация математической модели SRM с помощью библиотеки SimPower программы Matlab/Simulink

Представленные на рис. 2 графики являются переходной характеристикой SRM – реакцией на скачок приложенного питающего напряжения.

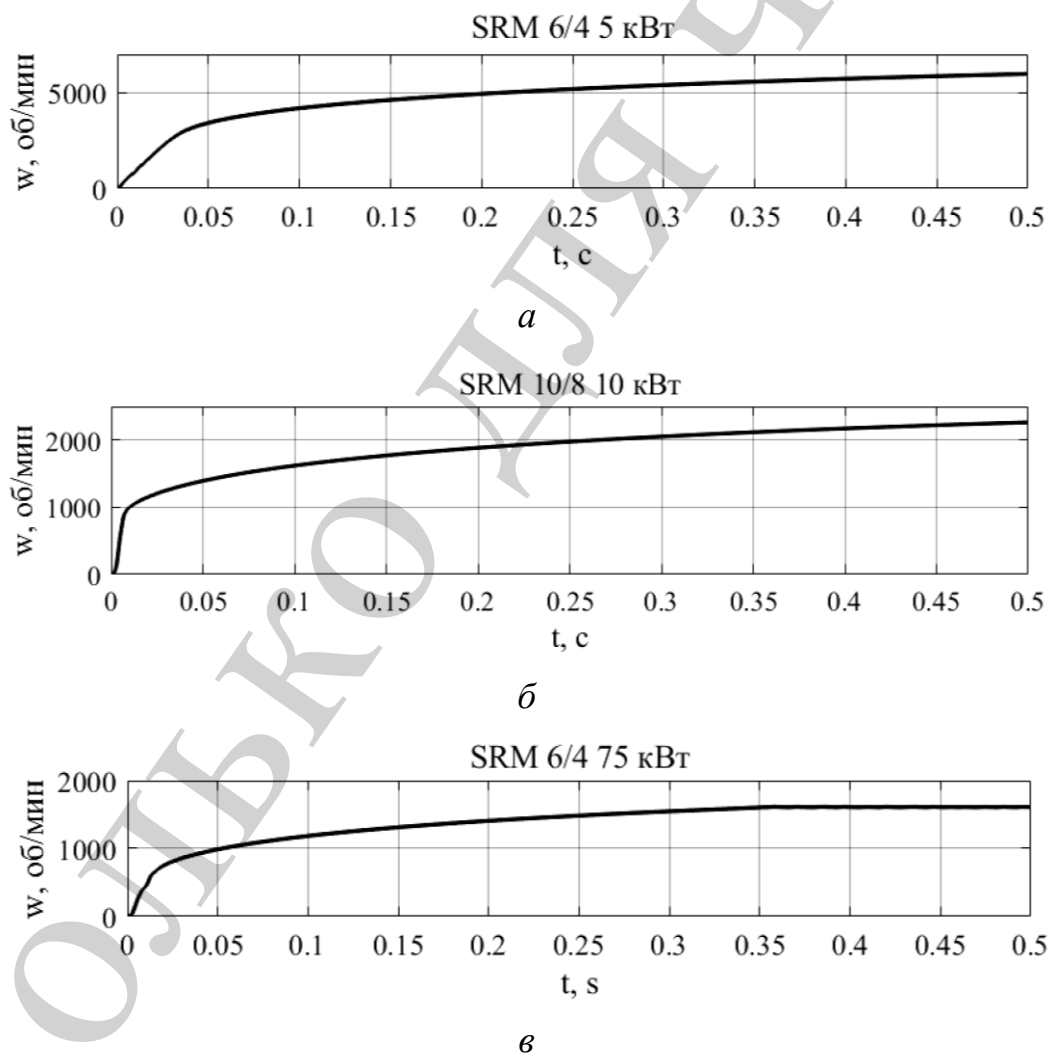


Рис. 2. Переходные процессы запуска SRM различной конструкции и мощности, полученные на математической модели: *a* – зубцовое отношение 6/4, мощность 5 кВт; *б* – зубцовое отношение 10/8, мощность 10 кВт; *в* – зубцовое отношение 6/4, мощность 75 кВт

Как показывает визуальный анализ результатов математического моделирования, характер изменения угловой скорости в процессе пуска SRM носит качественно близкий характер, не зависящий от мощности SRM и величины зубцового деления. Изменение скорости SRM во времени хотя и носит апериодический характер, существенно отличается от экспоненциальной формы: в начальной стадии скорость изменяется более интенсивно, а во второй – более затянута. Нелинейность характеристик SRM обусловлена динамическим изменением параметров SRM при изменении угловой скорости в процессе пуска.

В дальнейшем в качестве объекта исследований рассматривался SRM с зубцовым соотношением статора и ротора 6/4, мощностью 5 кВт. Для имитации различных технологических условий эксплуатации рассматривались варианты режима пуска SRM с двумя различными значениями момента инерции. Варианты переходных характеристик объекта исследования приведены рис. 3.

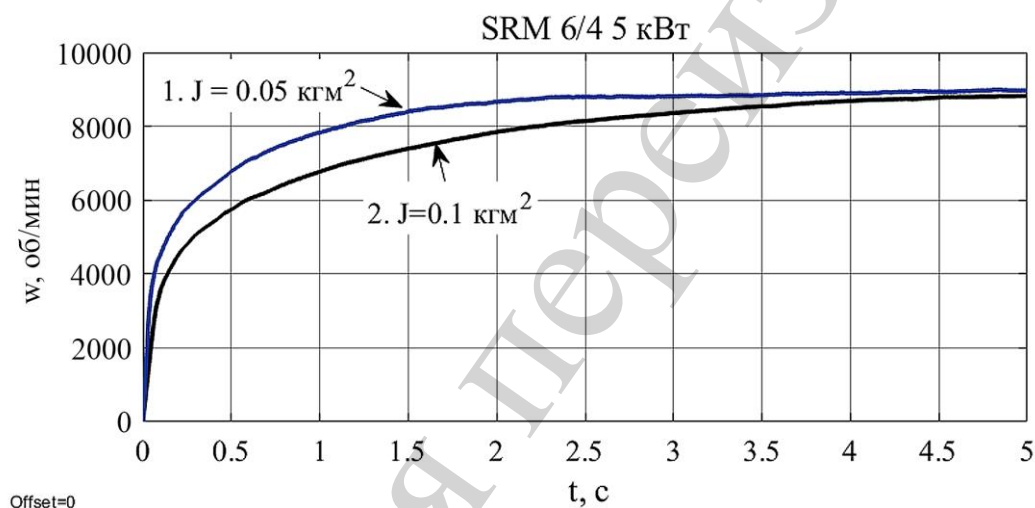


Рис. 3. Переходные характеристики пуска SRM 6/4 мощностью 5 кВт с различным значением момента инерции электропривода

Рассматривая полученные данные как переходную функцию, вызванную приложенным питающим напряжением, можно перейти к идентификации SRM как объект управления по каналу «напряжения питания – угловая скорость».

5. Идентификация SRM дробно-рациональными передаточными функциями целого порядка

Для идентификации SRM и определения передаточной функции по каналу «Напряжение питания – частота вращения ротора» был использован инструмент System Identification Toolbox (SIT) программы Matlab.

SIT предназначен для синтеза линейных и нелинейных моделей по измеренным данным на входе и выходе объекта идентификации. Идентифицируемая система может быть представлена как чёрный ящик для оценки параметров определенной пользователем модели. SIT предлагает множество методов иден-

тификации: максимального правдоподобия, минимизации ошибки прогноза, системной идентификации подмножества и другие.

При идентификации SRM по полученным в разделе 4 переходным характеристикам в качестве математической модели были использованы дробно/рациональные функции классов rat23 и rat34. Показателем соответствия использованной модели и исходных данных является коэффициент регрессии R . Нижней границей числового значения коэффициента регрессии, сигнализирующей о неудовлетворительном соответствии использованной модели и исходных данных, принято $R_{\min}=80\%$. В результате обработки исходных данных, представленных на рис. 3, были получены числовые коэффициенты многочленов числителя и знаменателя для различных вариантов передаточных функций SRM и соответствующие им коэффициенты регрессии, табл. 2.

Таблица 2

Варианты идентификации переходной характеристики запуска SRM с различными моментами инерции

№ пп	Момент инерции SRM	Передаточная функция	Коэффициент регрессии R , %
1	$J=0.05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\frac{149.8s^2 + 3e^5s + 1.11e^6}{s^3 + 616.7s^2 + 1.98e^4s + 3.72e^4}$	91.42
2	$J=0.05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\frac{252.2.8s^3 + 8.07e^4s^2 + 1.09e^6s + 2.13e^6}{s^4 + 153.8s^3 + 7040s^2 + 5.56e^4s + 7.02e^4}$	98.38
3	$J=0.1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\frac{51.02s^2 + 3,04e^4s + 8.53e^4}{s^3 + 134.6s^2 + 2429.5s + 2962.2}$	65.8
4	$J=0.1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$\frac{127s^3 + 1.866e^4s^2 + 2.137e^5s + 3.069e^6}{s^4 + 71.462s^3 + 1946s^2 + 1.197e^4s + 1.038e^4}$	85.62

Из приведенных данных видно, что при моменте инерции $J=0,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ моделирование SRM передаточной функцией класса rat32 выполняется с коэффициентом регрессии $R=65.8\% < R_{\min}$.

Таким образом, достаточную сходимость результатов во всем исследуемом диапазоне момента инерции SRM можно получить при идентификации дробно-рациональной передаточной функцией класса rat34, имеющей три нуля и четыре полюса. Высокий порядок передаточной функции SRM и невысокая точность идентификации могут обусловить низкое качество управления.

6. Идентификация SRM дробномерными передаточными функциями

Альтернативным вариантом идентификации нелинейных динамических объектов с переходной функцией сложной формы, рис. 3, является применение аппарата fractional differential equation (FDE) и представления объектов управления соответствующими передаточными функциями.

Дробномерное дифференциальное исчисление является обобщением операций интегрирования и дифференцирования на оператор нецелого порядка ${}_a D_t^\alpha$, где a и t определяют пределы операции, а α задает дробный порядок операции следующим образом:

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha}, & \Re(\alpha) > 0, \\ 1, & \Re(\alpha) = 0, \\ \int_a^t (dt)^{-\alpha}, & \Re(\alpha) > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где предполагается, что $\alpha \in \mathbb{R}$, но может принимать и комплексное значение [23]. Существует несколько общепринятых определений дробномерного дифференциала, например,

– определение Римана-Лиувилля [24]:

$${}_a D_t^\alpha = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \left(\frac{d}{dt} \right)^m \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}} dt, \quad (2)$$

для $m-1 < \alpha < m$, $m \in \mathbb{N}$, где $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция Эйлера;

– альтернативное определение Грюнвальда-Летникова [24]:

$${}_a D_t^\alpha = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\left[\frac{t-a}{h} \right]} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh), \quad (3)$$

где символ $[\cdot]$ обозначает операцию взятия целой части.

Преобразование Лапласа α -й производной сигнала $x(t)$, где $\alpha \in \mathbb{R}_+$, (при условии нулевых начальных условий), задается формулой:

$$L(D^\alpha x(t)) = s^\alpha X(s). \quad (4)$$

На рис. 4 приведены переходные функции для апериодического, а), и колебательного б), дробномерных звеньев, рассчитанные с помощью FOMCON MATLAB Toolbox.

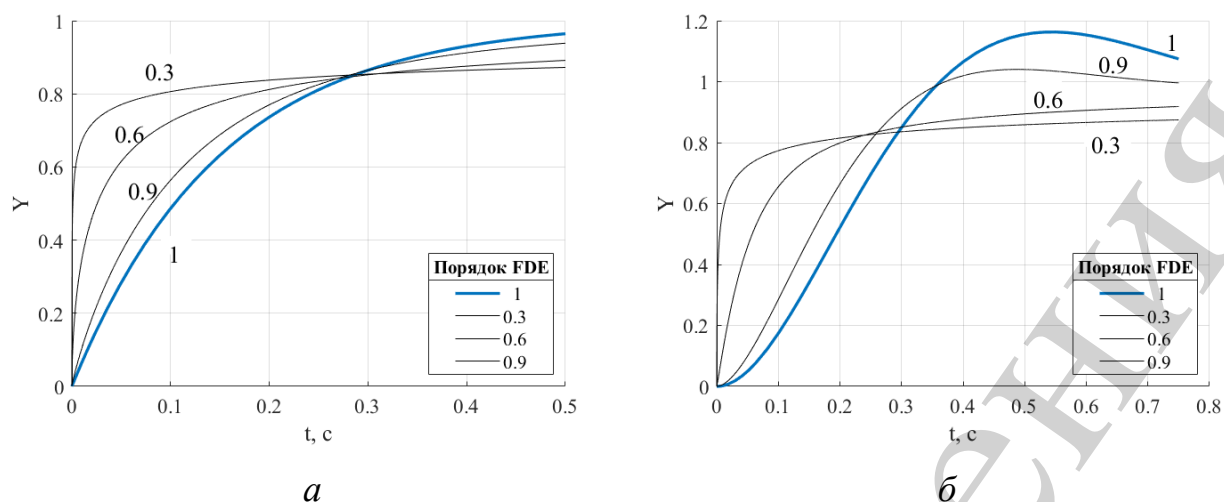


Рис. 4. Переходные функции для дробномерных звеньев различных порядков:
а – аperiodического; *б* – колебательного

Полученные переходные характеристики элементарных дробномерных звеньев качественно весьма близки к реальной переходной характеристике SRM, (рис. 3).

Для идентификации SRM дробномерными передаточными функциями был использован FOMCON MATLAB Toolbox (FMT) [19], который по функциональным возможностям наиболее близок к System Identification Toolbox. FMT предоставляет возможность идентификации дробномерных объектов управления по характеристикам, как во временной, так и в частотной области. FMT позволяет идентифицировать объект управления моделью дробного порядка в непрерывном времени в форме

$$G(s) = \frac{\sum_{i=0}^m b_i \cdot s^{\beta_i}}{\sum_{j=0}^n a_j \cdot s^{\alpha_j}}. \quad (5)$$

Идентификация выполняется путем настройки исходной модели с использованием метода наименьших квадратов, минимизирующего норму ошибки

$$\|y(t) - y_{id}(t)\|^2, \quad (6)$$

путем поиска требуемого набора параметров

$$\Theta = \begin{bmatrix} a_n & a_{n-1} & \cdots & a_0 \\ \alpha_n & \alpha_{n-1} & \cdots & \alpha_0 \\ b_m & b_{m-1} & \cdots & b_0 \\ \beta_m & \beta_{m-1} & \cdots & \beta_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

С помощью FOMCON MATLAB Toolbox была выполнена процедура идентификации переходных характеристик пуска SRM с различными значениями момента инерции электропривода. Результаты идентификации приведены в табл. 3.

На рис. 5 представлены результаты верификации полученных моделей, выполненной непосредственно в FOMCON MATLAB Toolbox.

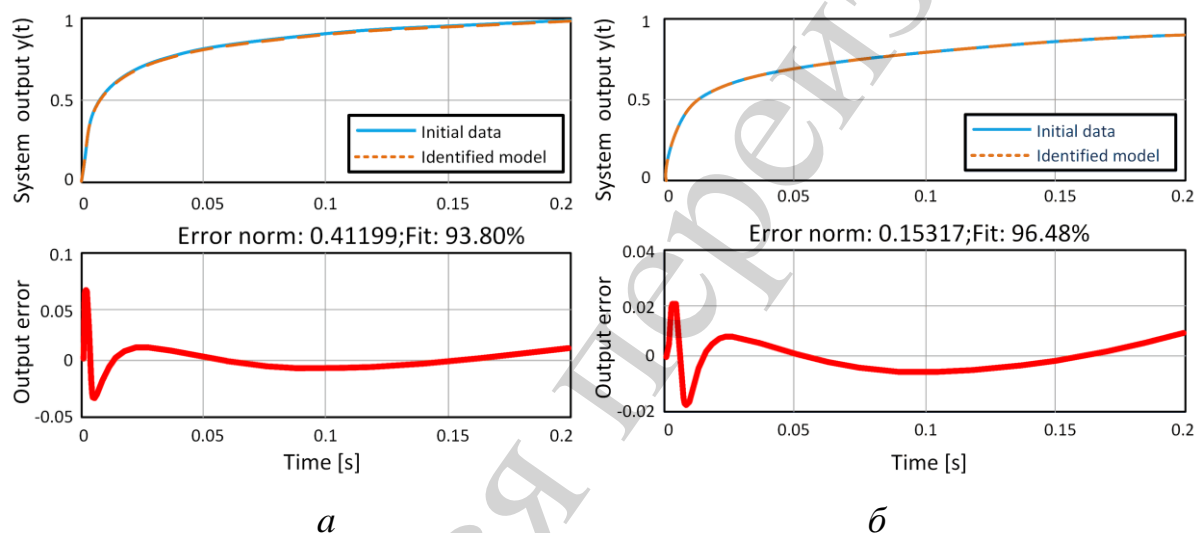


Рис. 5. Результаты верификации переходных характеристик пуска электропривода с SRM дробномерными передаточными функциями с различным значением момента инерции электропривода: *a* – $J=0.05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ $R=93.8 \%$; *б* – $J=0.1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ $R=96.48 \%$

Таблица 3

Результаты идентификации переходных характеристик пуска электропривода с SRM дробномерными передаточными функциями.

№ пп	Момент инерции SRM	Передаточная функция	Коэффициент регрессии R , %
1	$J=0.05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$W(s) = \frac{1}{0.0212s^{0.78} + 0.88s^{0.092} + 1}$	93.8
2	$J=0.1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$	$W(s) = \frac{1}{0.039s^{1.156} + 0.87s^{0.1802} + 1}$	96.48

Установлено, что структура передаточных функций процесса пуска SRM не зависит от величины момента инерции и описывается звеном второго поряд-

ка. Для рассмотренных вариантов запуска SRM коэффициент регрессии R составляет 93–96 %, что подтверждает высокую точность полученных моделей. Также необходимо отметить, что значение коэффициента регрессии R слабо зависит от величины момента инерции и существенно превышает коэффициент регрессии, полученный при идентификации SRM дробно-рациональной передаточной функцией класса rat34 , табл. 2.

7. Синтез дробномерного $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ -регулятора

PID-регулятор дробного порядка был впервые введен Podlubny в [25]. Этот обобщенный регулятор называется $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ регулятором и имеет интегратор с порядком λ и дифференциатор порядка μ . Недавние исследования показывают, что $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ регулятор дробного порядка превосходит классический PID в ряде приложений [26–29].

Передаточная функция ПИД-регулятора дробного порядка имеет вид:

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} + K_D \cdot s^\mu. \quad (8)$$

Очевидно, если принять $\lambda=\mu=1$ результатом является классический PID-регулятор целого порядка. $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ регулятор имеет значительно большие возможности в настройке контроллера.

Был выполнен синтез классического PID-регулятора целого порядка для варианта идентификации SRM дробно-рациональной передаточной функцией, согласно табл. 2–4. Настройка PID-регулятора была выполнена в MATLAB с помощью встроенного инструмента для автоматической настройки PID-регулятора.

Синтез параметров $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ -регулятора был выполнен с применением инструментальных средств FOMCON MATLAB Toolbox. Оптимизация регулятора выполнена по критерию минимума интегральной квадратичной ошибки (integral square error) переходной функции замкнутой системы управления.

Используем модель объекта управления, полученную путем идентификации процесса запуска SRM, приведенную в (8):

$$W_{2J} = \frac{1}{0.039s^{1.156} + 0.87s^{0.1802} + 1}. \quad (9)$$

Первоначально параметры PID-регулятора устанавливаются в $K_p=K_I=K_D=100$; $\lambda=\mu=1$. На первом этапе показатели степени фиксированы так, что практически оценивался PID-регулятор целого порядка. Пределы поиска установлены в диапазоне $K=[0; 1000]$ для коэффициентов передачи. Для моделирования по умолчанию используется уточненное приближение фильтра Оусталоупа (Oustaloup) со следующими параметрами ($\omega=[0.0001; 10000]$; $N=10$). Оптимизация с помощью этих настроек приводит к следующему набору параметров PID-регулятор целого порядка: $K_p=0.33295$; $K_I=12.45$; $K_D=2.4011$.

Затем фиксируются коэффициенты усиления, а начальные порядки интегратора и дифференциатора устанавливаются равными $\lambda=\mu=1=0.5$.

В результате оптимизации, найдены следующие порядки интегратора и дифференциатора: $\lambda=0.31875$ и $\mu=0.95597$. Параметры настройки $PI^\lambda D^\mu$ – регулятора, полученные в FOMCON MATLAB Toolbox, представлены на рис. 6.

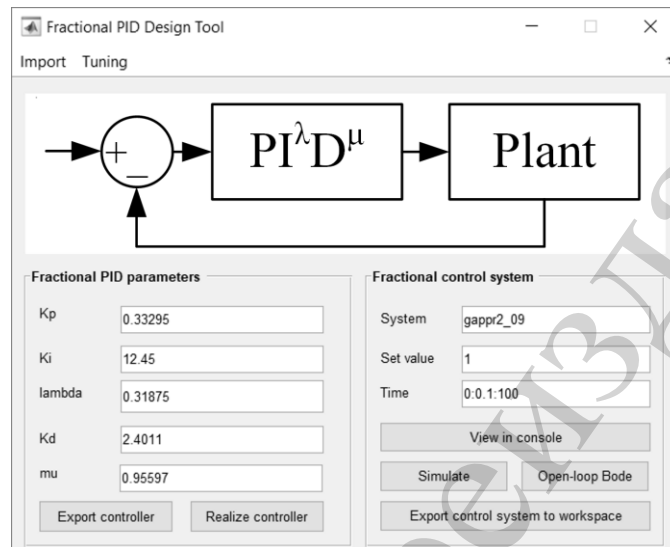


Рис. 6. Результаты автоматической настройки $PI^\lambda D^\mu$ – регулятора, полученные в FOMCON MATLAB Toolbox

Был выполнен сравнительный анализ процессов запуска SRM в разомкнутой системе управления, а также запуска в замкнутой системе управления с классическим PID-регулятором целого порядка и с дробномерным $PI^\lambda D^\mu$ -регулятором. Полученные результаты представлены на рис. 7.

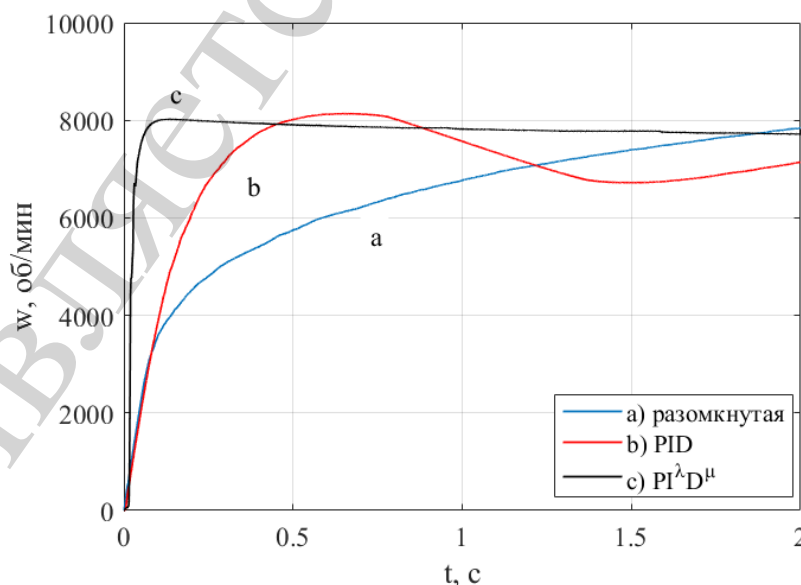


Рис. 7. Запуск SRM с различными вариантами разработанных PID-регуляторов для разомкнутой и замкнутой систем управления

Использование дробномерного $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора по сравнению с классическим регулятором целого порядка позволяет снизить перерегулирование с 13.3 % до 2.64 %, повысить быстродействие замкнутой САУ, время регулирования снизилось с 1.48 с до 0.53 с при снижении колебательности переходной характеристики.

Полученные результаты подтверждают превосходство $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора над классическим регулятором целого порядка. Замкнутая система управления с $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятором обладает большим быстродействием и меньшим перерегулированием по сравнению с регулятором целого порядка при отсутствии ограничений на форсировку управления.

8. Обсуждение результатов исследований замкнутых систем управления SRM с дробномерным $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятором

С помощью библиотеки SimPower в Matlab/Simulink выполнено математическое моделирование пусковых процессов SRM в диапазоне мощностей от 5 до 75 кВт с различными зубцовыми делениями и моментом инерции рабочей машины. Установлено, что форма переходных характеристик SRM по угловой скорости (рис. 2, 3), не зависит от мощности и конструкции SRM и носит апериодический, существенно отличающийся от экспоненциального характер. Нелинейность характеристик SRM обусловлена динамическим изменением параметров SRM при изменении угловой скорости в процессе пуска. Выдвинута гипотеза о возможности идентификации SRM дробномерной передаточной функцией.

С помощью Matlab/System Identification Toolbox выполнена идентификация SRM дробно-рациональными передаточными функциями целого порядка. При идентификации SRM дробно-рациональной передаточной функцией класса $rat34$ коэффициент регрессии полученной модели составил 85 % (табл. 2). Идентификация SRM дробномерной передаточной функцией была выполнена с помощью FOMCON MATLAB Toolbox. При идентификации SRM дробномерной передаточной функцией второго порядка коэффициент регрессии составил 93–96 % (рис. 5, табл. 3), что подтверждает преимущество использования предложенной дробномерной модели SRM. С помощью FOMCON MATLAB Toolbox был синтезирован $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятор, оптимизированный по минимуму интегральной квадратичной ошибки переходной функции замкнутой системы управления дробномерным объектом управления (рис. 6). Сравнительный анализ процессов пуска SRM с различными типами регуляторов показал, что применение дробномерного $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора по сравнению с классическим регулятором целого порядка позволяет снизить перерегулирование с 13.3 % до 2.64 %, повысить быстродействие замкнутой САУ, время регулирования снизилось с 1.48 с до 0.53 (рис. 7).

Полученные результаты подтверждают возможность идентификации SRM дробномерной передаточной функцией и повышение качества управления SRM при использовании дробномерного $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора.

Важным вопросом настоящего исследования, который может негативно повлиять на сделанные выводы, является влияние случайных ошибок измере-

ния на работу замкнутой дробномерной системы управления. Вопросы распространения вычислительных ошибок для дробномерных дифференциальных уравнений в современной вычислительной математике не исследованы.

Дальнейшие исследования рассмотренной проблемы могут заключаться в установлении существования однозначной зависимости между электромеханическими параметрами SRM (активным сопротивлением и индуктивностью обмоток, моментом инерции и т. д.) и параметрами дробномерной передаточной функции SRM (табл. 2), и параметрами дробномерного $PI^{\lambda}D^{\mu}$ – регулятора.

9. Выводы

1. С помощью библиотеки SimPower в Matlab/Simulink выполнено математическое моделирование пусковых процессов SRM в диапазоне мощностей от 5 до 75 кВт с различными зубцовыми делениями. Установлено, что форма переходных характеристик SRM по угловой скорости не зависит от мощности и конструкции SRM, и носит аperiodический, существенно отличающийся от экспоненциального характер. Нелинейность характеристик SRM обусловлена динамическим изменением параметров SRM при изменении угловой скорости в процессе пуска. Выдвинута гипотеза о возможности идентификации SRM дробномерной передаточной функцией.

2. С помощью System Identification Toolbox выполнена идентификация SRM дробно-рациональными передаточными функциями целого порядка. Достаточная сходимость результатов была получена при идентификации SRM дробно-рациональной передаточной функцией класса rat34, имеющей три нуля и четыре полюса, коэффициент регрессии полученной модели составил 85 %. С помощью FOMCON MATLAB Toolbox выполнена идентификация процесса пуска SRM дробномерной передаточной функцией второго порядка. Коэффициент регрессии дробномерной модели составляет 93–96 %, что подтверждает преимущество использования предложенной дробномерной идентификации.

3. Для полученных передаточных функций процесса пуска SRM синтезирован дробномерный $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятор, оптимизированный по минимуму интегральной квадратичной ошибки (integral square error) переходной функции замкнутой системы управления дробномерным объектом управления. Для синтеза $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора был применен FOMCON MATLAB Toolbox. Выполнен сравнительный анализ процессов запуска SRM в разомкнутой системе управления, а также запуска в замкнутой системе управления с классическим PID-регулятором целого порядка и с дробномерным $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятором. В исследуемом случае использование дробномерного $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора по сравнению с классическим регулятором целого порядка позволяет снизить перерегулирование с 13.3 % до 2.64 %, повысить быстродействие замкнутой САУ, время регулирования снизилось с 1.48 с до 0.53.

Полученные результаты подтверждают превосходство дробномерного $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -регулятора над классическим регулятором целого порядка.

Литература

1. Клепиков В. Б., Полянская И. С. Вентильно-индукторный электропривод – перспективы развития // Вісник національного технічного університету "ХПІ". 2002. № 1. С. 42–48.
2. Hendershot Jr. J. R. AC, Brushless, Switched Reluctance Motor Comparisons. MagnaPhysics Publishing and Oxford science publications, 1991. P. 16–20. URL: http://www.jimhendershot.com/Jim_Hendershot/Articles_files/acbrushlessr motorcomparison.pdf
3. Птах Г. К. Вентильно – индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. № 3. С. 23–33.
4. Nidec buys Chinese motor-maker to boost its SR presence. URL: https://drivesncontrols.com/news/fullstory.php/aid/4659/Nidec_buys_Chinese_motor%E2%80%93maker_to_boost_its_SR_presence.html
5. SRDRIVE. URL: <http://www.srdrive.com/>
6. Avtron Industrial Automation Acquired By Nidec. URL: <http://www.nidec-avtron.com/encoders/news/archived/avtron-industrial-automation-acquired-by-nidec>
7. Bulk Handling. URL: <http://www.srdrives.com/mining-drives.shtml>
8. Model VSR. URL: [https://www.global.weir/assets/files/product%20 brochures/Roto-Jet%20VSR.pdf](https://www.global.weir/assets/files/product%20brochures/Roto-Jet%20VSR.pdf)
9. Optimized electric Drivetrain by INtegration. URL: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/104481/factsheet/en>
10. Jianzhong Y., Lihua H. Nonlinear predictive control for SRM based on TSE // 2009 Chinese Control and Decision Conference. 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/ccdc.2009.5195068>
11. Mukherjee J., Chowdhuri S. Multiobjective Optimisation by PSO for Switched Reluctance Motor (SRM) Drive // Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. 2014. doi: <https://doi.org/10.5220/0005101403910396>
12. Rouhani H., Milasi R. M., Lucas C. Speed Control of Switched Reluctance Motor (SRM) Using Emotional Learning Based Adaptive Controller // 2005 International Conference on Control and Automation. 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/icca.2005.1528140>
13. Jie X., Shiyu W. The single neuron adaptive PI control of SRM based on IPSO // 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/ccdc.2013.6561879>
14. Identification of the active resistances of the stator of an induction motor with stator windings dissymmetry / Tytiuk V., Pozigun O., Chorny O., Berdai A. // 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248949>
15. A Model of the Assessment of an Induction Motor Condition and Operation Life, Based on the Measurement of the External Magnetic Field / Zagirnyak M., Bisikalo O., Chorna O., Chorny O. // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559564>

16. Analysis of reliability of the mathematical model of the SRM / Berdai A., Vlasenko V., Titjuk V., El Moudden A. // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2012. Vol. 41, Issue 1. P. 60–67.
17. Garrappa R. Numerical Solution of Fractional Differential Equations: A Survey and a Software Tutorial // *Mathematics*. 2018. Vol. 6, Issue 2. P. 16. doi: <https://doi.org/10.3390/math6020016>
18. Черный А. П., Сергиенко С. А. Виртуальный комплекс с параметрической настройкой на параметры электромеханической системы // *Техническая электродинамика*. 2019. № 1. С. 38–41. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.038>
19. FOMCON. URL: <http://fomcon.net/>
20. The CRONE toolbox for Matlab / Oustaloup A., Melchior P., Lanusse P., Cois O., Dancla F. // *CACSD. Conference Proceedings. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design* (Cat. No. 00TH8537). 2000. doi: <https://doi.org/10.1109/cacsd.2000.900210>
21. Toolbox ninteger for MatLab, v. 2.3. URL: <http://web.ist.utl.pt/duarte.valerio/ninteger/ninteger.htm>
22. Busher V., Aldairi A. Synthesis and technical realization of control systems with discrete fractional integral-differentiating controllers // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4, Issue 2 (94). P. 63–71. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139892>
23. Chen Y., Petras I., Xue D. Fractional order control – A tutorial // 2009 American Control Conference. 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/acc.2009.5160719>
24. Fractional order Systems and Controls: Fundamentals and Applications / Monje C. A., Chen Y., Vinagre B., Xue D., Feliu V. // *Advances in Industrial Control*. Springer, 2010. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-335-0>
25. Podlubny I. Fractional-order systems and fractional-order controllers. Slovak Acad. Sci., 1994.
26. Luo Y., Chen Y. Q. Fractional-order [proportional derivative] controller for robust motion control: Tuning procedure and validation // 2009 American Control Conference. 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/acc.2009.5160284>
27. Čech M., Schlegel M. The fractional-order PID controller outperforms the classical one // *Process control 2006*. Pardubice Technical University, 2006. P. 1–6.
28. Serhiienko S., Serhiienko I. Performance enhancement of the relay automatic control system with a fractional-order controller // 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248956>
29. Zagirnyak M., Serhiienko S., Serhiienko I. Improvement of the qualitative characteristics of an automatic control system with a fractional-order PID-controller // 2017 18th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/cpee.2017.8093062>